Pe APA | Publicación Electrónica
ASOCIACIÓN PALEONTOLÓGICA ARGENTINA

www.peapaleontologica.org.ar

Metodología y análisis en la digitalización de cuerpos microscópicos: su aplicación a los estudios fitolíticos

SEBASTIÁN ARIEL FREZZIA[1,2]
ALEJANDRO FABIÁN ZUCOL[1,2]

1. Laboratorio de Paleobotánica, Centro de Investigación Científica y de Transferencia Tecnológica a la Producción (CICYTTP), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Provincia de Entre Ríos - Universidad Autónoma de Entre Ríos (UADER). España 149, E3105BWA Diamante, Entre Ríos, Argentina.
2. Facultad de Ciencia y Tecnología - Universidad Autónoma de Entre Ríos (FCyT-UADER). Ruta Provincial N°11, Km. 10,5, E3100 Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

Recibido: 23 de mayo 2023 - **Aceptado:** 28 de agosto 2023 - **Publicado:** 13 de septiembre 2023

Para citar este artículo: Sebastián Ariel Frezzia y Alejandro Fabián Zucol (2023). Metodología y análisis en la digitalización de cuerpos microscópicos: su aplicación a los estudios fitolíticos. *Publicación Electrónica de la Asociación Paleontológica Argentina* 23(2): 114–123.

Link a este artículo: http://dx.doi.org/10.5710/PEAPA.25.08.2023.475

ISSN 2469-0228

Asociación Paleontológica Argentina
Maipú 645 1° piso, C1006ACG, Buenos Aires
República Argentina
Tel/Fax (54-11) 4326-7563
Web: www.apaleontologica.org.ar

ARTÍCULO Año 2023 - 23(2): 114–123

Pe APA | Publicación Electrónica
ASOCIACIÓN PALEONTOLÓGICA ARGENTINA

METODOLOGÍA Y ANÁLISIS EN LA DIGITALIZACIÓN DE CUERPOS MICROSCÓPICOS: SU APLICACIÓN A LOS ESTUDIOS FITOLÍTICOS

SEBASTIÁN ARIEL FREZZIA[1,2] Y ALEJANDRO FABIÁN ZUCOL[1,2]

[1]Laboratorio de Paleobotánica, Centro de Investigación Científica y de Transferencia Tecnológica a la Producción (CICYTTP), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Provincia de Entre Ríos - Universidad Autónoma de Entre Ríos (UADER). España 149, E3105BWA Diamante, Entre Ríos, Argentina.
[2]Facultad de Ciencia y Tecnología - Universidad Autónoma de Entre Ríos (FCyT-UADER). Ruta Provincial N°11, Km. 10,5, E3100 Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.
sfrezzia@gmail.com; *cidzucol@gmail.com*

SAF: https://orcid.org/0000-0002-4987-7597; **AFZ:** https://orcid.org/0000-0001-5480-3456

Resumen. La continua evolución de herramientas aplicadas en digitalización y modelado 3D, en el último tiempo, ha permitido su utilidad en diferentes campos científicos, uno de ellos la paleontología, dando beneficios en relación al estudio y la exposición de materiales fósiles. En el presente trabajo se exponen dos metodologías para digitalización de morfotipos fitolíticos como modelos tridimensionales a partir de imágenes en dos dimensiones utilizando *software* de libre acceso, denominados modelo de burbujas y modo esculpir. Ambas metodologías se consideran complementarias a la hora de generar un modelo de fitolito tridimensional. Esta propuesta resulta eficaz para lograr modelados 3D, generando no sólo una forma amigable para visualizar dichos morfotipos, sino también una manera efectiva para el conocimiento y entendimiento de la variedad de morfologías que pueden caracterizar a los silicofitolitos.

Palabras clave. Fitolitos 3D. Modelado. Esculpir. Dust3D. Blender.

Abstract. METHODOLOGY AND ANALYSIS IN THE DIGITIZATION OF MICROSCOPIC BODIES: APPLICATION TO PHYTOLITHIC STUDIES. The continuous evolution of tools applied in 3D digitization and modelling in recent times has allowed their utility in different scientific fields, one of them being paleontology, providing benefits for the study and exposure of fossil materials. In this paper, we present two methodologies for digitizing phytolith morphotypes as three-dimensional models from two-dimensional images using freely available software called bubble model and sculpting mode. Both methodologies are considered complementary when generating a three-dimensional phytolith model. This approach is effective in achieving 3D modelling, generating not only a user-friendly way to visualize such morphotypes but also an effective way to the knowledge and understanding of the variety of morphologies that characterize silicophytoliths.

Key words. Phytolith 3D. Modelling. Sculpting. Dust3D. Blender.

La obtención digital de cuerpos en tres dimensiones mediante imágenes digitales en enfoques múltiples es una metodología que se ha desarrollado recientemente con la finalidad de obtener modelos tridimensionales, ya sea para cuerpos o para escenas. Esto ha permitido desarrollar diferentes metodologías y artefactos para la obtención de modelos, en lo que genéricamente se denomina escáneres 3D. Dicha herramienta permite tomar puntos de superficies entorno al objeto a digitalizar conformando una nube de puntos y permitiendo extrapolar la forma del objeto. Con ello, se logra reconstruir la interrelación geométrica mediante la vinculación de dichos puntos aledaños. Finalmente, se obtiene un posicionamiento tridimensional de cada punto en un sistema esférico de coordenadas, integrando estas localizaciones en un sistema común de referencia (Bernardini y Rushmeier, 2002).

En referencia a otras técnicas para registro en tres dimensiones, inicialmente la más accesible y empleada es la técnica fotogramétrica, la cual se basa en la realización de un modelo 3D partiendo de fotografías en múltiples ángulos. Sin embargo, para lograr una mayor fidelidad y detalle de la recreación se prefieren emplear escáneres 3D (Ruiz Torres, 2017).

Para realizar la digitalización de un cuerpo microscópico, si bien existen experiencias realizadas mediante micromanipuladores (Rovner, 1971) que actuarían como escáneres de contacto empleado en los macroobjetos, resulta bastante complejo y costoso cuando nos referimos a cuerpos pequeños que requieren de un aumento superior a los 400x, como en el caso de fitolitos. Es por esta razón que al realizar

la digitalización de estos elementos se deben utilizar metodologías alternativas.

Los silicofitolitos son biominerales de sílice formados en los tejidos vegetales, originados como depósitos de sílice amorfa hidratada ($SiO_2.nH_2O$) en espacios inter o intracelulares del tejido vegetal (Blackman, 1971; Piperno, 1988, 2006). Los fitolitos, en muchos de sus casos, adoptan la forma de la célula vegetal en que se deposita. Ante esto, varios autores han realizado trabajos donde describen y clasifican dichas células silíceas según los tejidos y órganos analizados (Metcalfe, 1960; Tomlinson, 1961; Ellis, 1979).

La clasificación de morfotipos fitolíticos según el Código Internacional para la Nomenclatura de Fitolitos (ICPN por su sigla en inglés) (Neumann *et al*., 2019) se basa en descriptores o principios para nombrar y describir dichos cuerpos biominerales; estas descripciones detallan variables como tamaño y forma, acompañados de superficie, textura y tipos de márgenes. Además de los antecedentes mencionados, es crucial considerar la posibilidad de interactuar con diversas morfologías fitolíticas en una visión tridimensional. Por ejemplo, Alexandre *et al.* (2015) publicaron reconstrucciones tridimensionales de fitolitos utilizando microscopía de rayos X; reconstruyeron fitolitos de células cortas procedentes de gramíneas (GSSC) con la finalidad de estudiar la estructura del silicofitolito. Con sus resultados lograron demostrar la existencia de cavidades internas como producto de la disolución de la sílice durante metodologías de extracción química, donde se imita el proceso de disolución que puede ocurrir en un entorno natural. Por su parte, Babot *et al.* (2016) realizaron la reconstrucción 3D de morfotipos del tipo BILOBATE, SADDLE y RONDEL, los cuales fueron registrados como extremos de un continuo morfológico de formas específicas que pueden encontrarse en un mismo morfotipo articulado.

Autores como Gallaher *et al.* (2020), estudiaron el tamaño y forma de fitolitos de células cortas en hojas de 70 especies de gramíneas (Poaceae) analizando morfotipos en 3D mediante microscopía confocal, logrando con ello establecer diferencias significativas entre especies.

La presente contribución tiene como objetivo describir los diferentes pasos y alternativas que se han utilizado para la obtención de modelos tridimensionales de fitolitos haciendo especial hincapié en el uso de *software* de libre acceso. Estos estudios resultan de gran relevancia, ya que podrían facilitar la identificación de diferencias taxonómicas mediante el modelado 3D, como también analizar los procesos tafonómicos que pueden influir en cambios de tamaño y forma en silicofitolitos. Al abordar estas áreas de investigación, se logra una comprensión más exhaustiva de la morfología de silicofitolitos.

De las observaciones microscópicas a los cuerpos tridimensionales. Cortes ópticos o sistemas de integración de diapositivas. Erdtman (1969) propuso un método denominado análisis luz/oscuridad (LO) para interpretar el relieve de la estructura polínica; este se basa en el efecto luminoso que se percibe al enfocar un objeto, mientras que el desenfocado se oscurece. El plano visual del enfoque del microscopio permite observar un corte óptico del objeto, por lo que, si se recorre en sentido vertical, considerando la luminosidad/oscuridad del cuerpo, es posible interpretar la estructura del mismo y si los relieves son positivos o negativos (Fig. 1).

Posteriormente, esta metodología de múltiple enfoque sería aplicada para la obtención de fotografías integradas, lo cual se puede realizar en la actualidad de modo manual mediante variaciones de los planos de corte óptico con el desplazamiento micrométrico de la platina o bien robotizado (en los microscopios que poseen este equipamiento) esta-

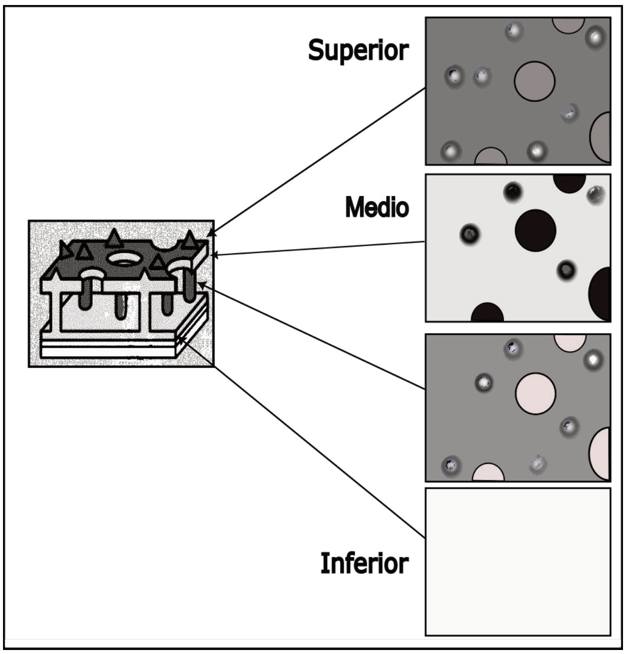


Figura 1. Representación esquemática de una pared polínica y su observación en distintos cortes ópticos de acuerdo al análisis LO.

bleciendo la equidistancia de cada fotografía. Una vez tomadas las distintas diapositivas (o variaciones de plano óptico de enfoque) la integración de las mismas se realiza mediante *software* adecuado para la compilación.

La compilación de imágenes donde se visualicen múltiples enfoques resulta de importancia, ya que al tomar una única fotografía de un elemento, tanto la escasa profundidad de campo que genera dificultades para enfocar el objeto de manera adecuada (Tindall y Kalms, 2012) como también la resolución óptica, se reducen debido al efecto de difracción (Goldsmith, 2000; Davies, 2010; Gallo *et al.*, 2014), generando dificultades para obtener una imagen de alta nitidez. La continua evolución de la industria informática ha desarrollado *software* que permiten combinar imágenes con diferentes enfoques en profundidades de campo para crear una pila de enfoque, como, por ejemplo, Auto-Mongate (Boyde, 2004), CombineZP (Adelson *et al.*, 1984), Helicon Focus (Brecko *et al.*, 2014) y Zerene Stacker (Brecko *et al.*, 2014).

Es importante destacar que muchos de los programas mencionados se pueden encontrar incluidos en el *software* de manejo de fotografías, si bien existen algunos específicos; para el caso de esta ejemplificación (Fig. 2) se utilizó CombineZP, que es uno de los editores de fotos gratuito diseñado para su uso con fotografías microscópicas.

Interpretación volumétrica de los cuerpos microscópicos. Como se mencionó anteriormente, a menos que se utilice un micromanipulador microscópico, resulta imposible obtener una vista completa de 360° del objeto a renderizar, en nuestro caso un silicofitolito. Por lo tanto, se emplean dos principales metodologías, considerando siempre de acompañarlas con la previa observación microscópica y su posterior análisis LO. Una de ellas es a partir de fotos utilizando *software* de modelado 3D, tratando de contar con al menos dos caras del cuerpo (de acuerdo a su forma). La otra opción es el esculpido a mano alzada sobre la base de las fotografías, la cual deja a la interpretación del operador aspectos específicos de los cuerpos.

La representación de modelos 3D en líneas generales pueden ser divididos en dos categorías. La primera, modelado de sólidos, define el volumen del objeto, y suele aplicarse en simulaciones no visuales, por ejemplo, en el área de ingenierías y medicina.

Por otro lado, existe el modelado 3D de cáscara o contorno, el cual representa la superficie, es decir, el contorno de un elemento y no su volumen. Independientemente de que tipo de modelado se pretende utilizar, existen tres principales tipos de representaciones 3D: malla de polígonos, malla de curvas y escultura digital 3D. El modelado poligonal logra la obtención de objetos 3D mediante el conjunto de caras unidas por vértices y permite modelar dicho elemento alterando el lugar de estos. En líneas generales se obtiene un cuerpo formado por vértices, aristas y caras confeccionando una superficie continua. Existen muchas aplicaciones, tanto libres como propietarias, destinadas a este fin como PhotoModeler (EOS Systems Inc, 1997), MeshLab (Cignoni *et al.*, 2008), Rhino (McNeel *et al.*, 2010), PointCloud (Rusu y Cousins, 2011), Rapidform (Payne, 2011).

Por otro lado, la técnica basada en curvas o superficies NURBS (*B-Splines* no racionales) utiliza vértices de control (VC) que al desplazarlos alteran la geometría del objeto, permitiendo crear modelos uniformes (Domínguez-Quintana *et al.*, 2004). Estos modelos resultan más fáciles de esculpir por el manejo de estas superficies conformantes. Algunas aplicaciones sólo ofrecen un diseño manual de las curvas, pero las más avanzadas ofrecen tanto manual como automático. Aplicaciones usadas para este modelado son T-Splines (Sederberg *et al.*, 2003), Rhino (McNeel *et al.*, 2010), Rapidform (Payne, 2011), Maya (Autodesk INC, 2019).

Mientras que también pueden obtenerse modelos a partir de escultura digital 3D, esta técnica ofrece herramientas para empujar, tirar, suavizar, agarrar y/o pellizcar de una sección para manipular un objeto digital como si estuviéramos manipulando arcilla. En breves palabras, este tipo de método enfoca la escultura a través de la deformación de una malla tridimensional, desplazando los vértices del modelo mediante la acción de los pinceles (Lanza, 2015).

Los métodos que se expondrán en el presente trabajo hacen hincapié en modelos de malla, los cuales se extrapolan para establecer modelos de superficie. Para ello utilizamos dos metodologías específicas; una denominada de burbujas, que logra implantar las mallas tridimensionales que se ajustarán en forma y superficie y, posteriormente, se le aplica un detalle superficial de texturizado. Este modelo ocupa imágenes guía. Por otro lado, se obtuvo el mismo ob-

jeto o modelo mediante la esculturización digital, en esta ocasión sin la utilización de imágenes guía como se hizo en el caso anterior. Esta variante de proceso requirió que algunas características de diseño deban ser abordadas por el operador. Ambas metodologías no se consideran alternativas sino complementarias. Por ejemplo, se podría comenzar un modelado mediante el método de burbujas utilizando imágenes guía como base para generar un modelo tridimensional y luego ajustar cambios específicos mediante el uso de *software* Blender en una segunda etapa de edición.

MATERIAL Y MÉTODOS

Digitalización de cuerpos microscópicos. Metodología aplicada a los fitolitos

En líneas generales, la metodología propuesta para digitalizar un morfotipo fitolítico tridimensional aplica a las reglas básicas para trabajos de esta índole. Esta metodología vincula diferentes *software* de libre acceso como CombineZP, Dust3D (https://dust3d.org) y Blender (Hess, 2010). La metodología inició con la visualización del fitolito a modelar mediante microscopio óptico Nikon Eclipse E200 y el mismo fue fotografiado mediante una cámara Nikon Coolpix S4. En nuestro caso, la imagen fue capturada a un aumento de 400x. Los fitolitos se determinaron y clasificaron según los descriptores propuestos por el ICPN (Neumann *et al*., 2019). Posteriormente, para garantizar una correcta visualización del elemento, se generó una imagen totalmente nítida del mismo la cual resultó como base para generar el modelo tridimensional. Esto se realizó mediante el *software* CombineZP. La etapa inició importando las imágenes tomadas de microscopio óptico, las cuales evidencian diferentes enfoques de el o los morfotipos fitolíticos que necesitamos compilar. Posteriormente, de las opciones que brinda el programa se seleccionó "*All Methods*"; de esta manera, el *software* utilizó las partes nítidas de cada fotografía para crear otra como compilación final. Vale destacar que este procesamiento puede demorar si se utilizan muchas imágenes (Fig. 2).

Una vez realizada/s la/s fotografía/s de base, empleamos dos diferentes técnicas mediante programas específicos para modelar en 3D (Tab. 1); la primera fue el modelo de burbujas, el cual se llevó a cabo mediante el *software* Dust3D. Esta metodología comenzó importando una imagen de microscopio óptico que incluyó al menos una vista frontal y otra lateral de un morfotipo fitolítico específico; esto puede ser una imagen *per se* de los morfotipos o un esquema del mismo a modo de guía. Las imágenes fueron alineadas horizontalmente a la misma altura para obtener una concordancia de los dos planos aplicados (Fig. 3.1–2). Si se opta por la opción de esquema, este puede ser realizado a partir de una imagen de microscopio la cual se carga en un programa de edición de imagen convencional y se aplica la

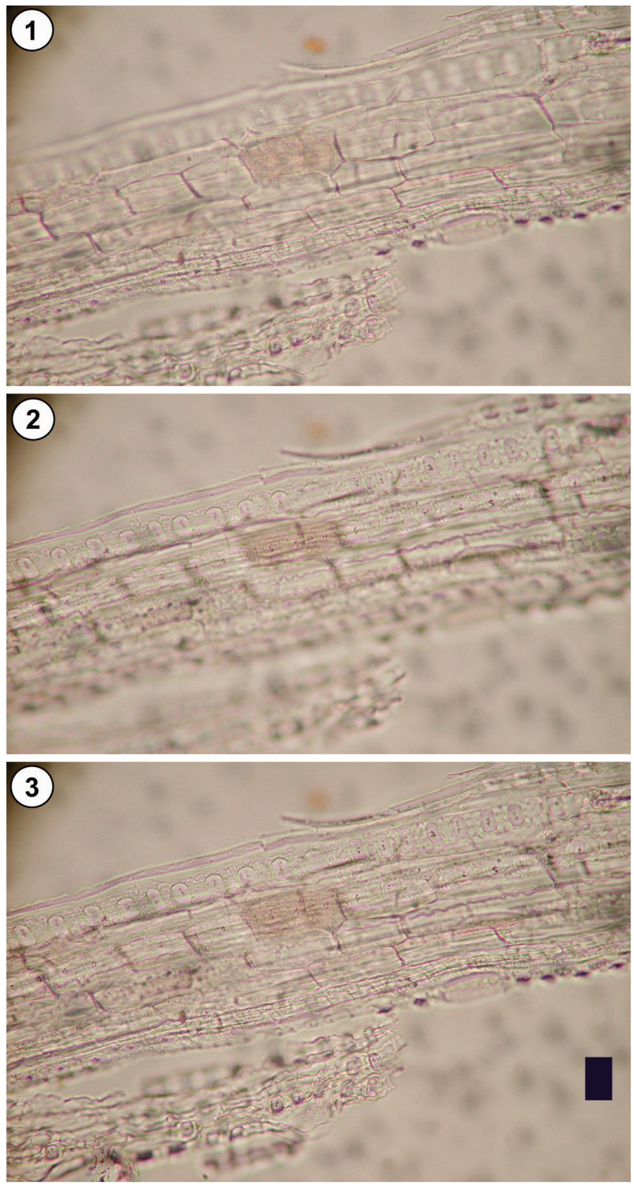


Figura 2. Renderización de fotografías mediante el apilamiento de dos imágenes tomadas en diferentes planos focales de una epidermis silicificada del género ***Muhlenbergia*** sp. **1–2,** diferentes planos focales; **3,** imagen compuesta. Escala= 20 μm.

TABLA 1 – Métodos propuestos para realizar modelados 3D de fitolitos

Método	Descripción
Burbuja utilizando Dust3D	1. Creación de imagen guía: obtener una fotografía frontal y lateral del fitolito, ya sea en formato fotográfico o vectorial.
	2. Importar imagen guía en Dust3D.
	3. Ubicar el nodo de inicio y establecer vínculos con los nodos restantes para determinar las dimensiones y la estructura del objeto.
	4. Generación de volumen al morfotipo fitolítico mediante el ajuste de manera variable el volumen de los nodos colocados.
	5. Exportar el modelo final en formato *object* (OBJ).
Modo esculpir utilizando Blender	1. Iniciar el modo de edición en el *software* Blender y crear un objeto inicial para el modelado (recomendación, esfera o cubo). Como opción, es posible importar el modelo en formato OBJ previamente creado en Dust3D.
	2. Seleccionar el modo de "*Scultping*" y utilizar la herramienta de pincel para modificar una región específica del objeto inicial y esculpir el morfotipo fitolítico deseado.
	3. Utilizar las herramientas restantes de escultura para aplicar cambios específicos en la forma y el volumen del objeto.
	4. Activar la herramienta suavizado y aplicar sobre las modificaciones realizadas para mejorar el detalle superficial.
	5. Texturizar el modelo mediante el modo edición "*Shading*".
	6. Modificar los nodos de textura para un mejor detalle del morfotipo. Opcional, descargar texturas de repositorios *web*.
	7. Aplicar retoques en superficie mediante la herramienta pincel "textura".
	8. Renderizar el objeto final y exportar a directorio específico de almacenamiento.

detección de bordes. Así, quedará un boceto real del objeto en formato vectorial para posteriormente editar en 3D.

La imagen de referencia se importó en el *software* Dust3D (Fig. 3.3) mediante la opción "*Change references sheet*" y, posteriormente, se colocó el nodo inicial en el lienzo según el fondo, dependiendo donde se decida iniciar el modelado. El tamaño de nodo se puede modificar posando el cursor sobre el nodo y modificando el radio del mismo, lo cual genera distintos tamaños de burbujas. Cada nodo conectó con los previamente colocados y mediante la interpretación de variables como volumen y la forma del objeto, se procedió a modelar el morfotipo fitolítico. Finalmente, posterior al modelado final del objeto, se exportó el mismo en formato *object* (OBJ), esto último para poder importarlo en otros *software* para culminar la edición. Al exportar el modelado final se generaron mallas de polígonos (Fig. 3.4) a la obtención volumétrica del objeto (Fig. 3.5–6). Posteriormente, se utilizó el *software* Blender para generar una densificación de mallas y alisado superficial para lograr mejores detalles al objeto en 3D (Fig. 3.7–8). Esto se realizó mediante el modo "Edición" que ofrece dicho *software*, aplicando sobre la malla del modelo el suavizado de vértices.

Existe otra alternativa para generar morfotipos en 3D. En este caso, corresponde a la segunda metodología propuesta en el presente trabajo, realizada mediante el modo esculpir del *software* Blender. Este proceso altera el área específica de un objeto base mediante el modelado utilizando la herramienta pincel (Fig. 4), es decir, dicha herramienta manipula la geometría de la región de influencia del pincel. De este modo, partiendo de un objeto base, por ejemplo una esfera, se puede modelar el objeto con los fines de recrear un cuerpo específico.

Para iniciar con este procesamiento, mediante el modo

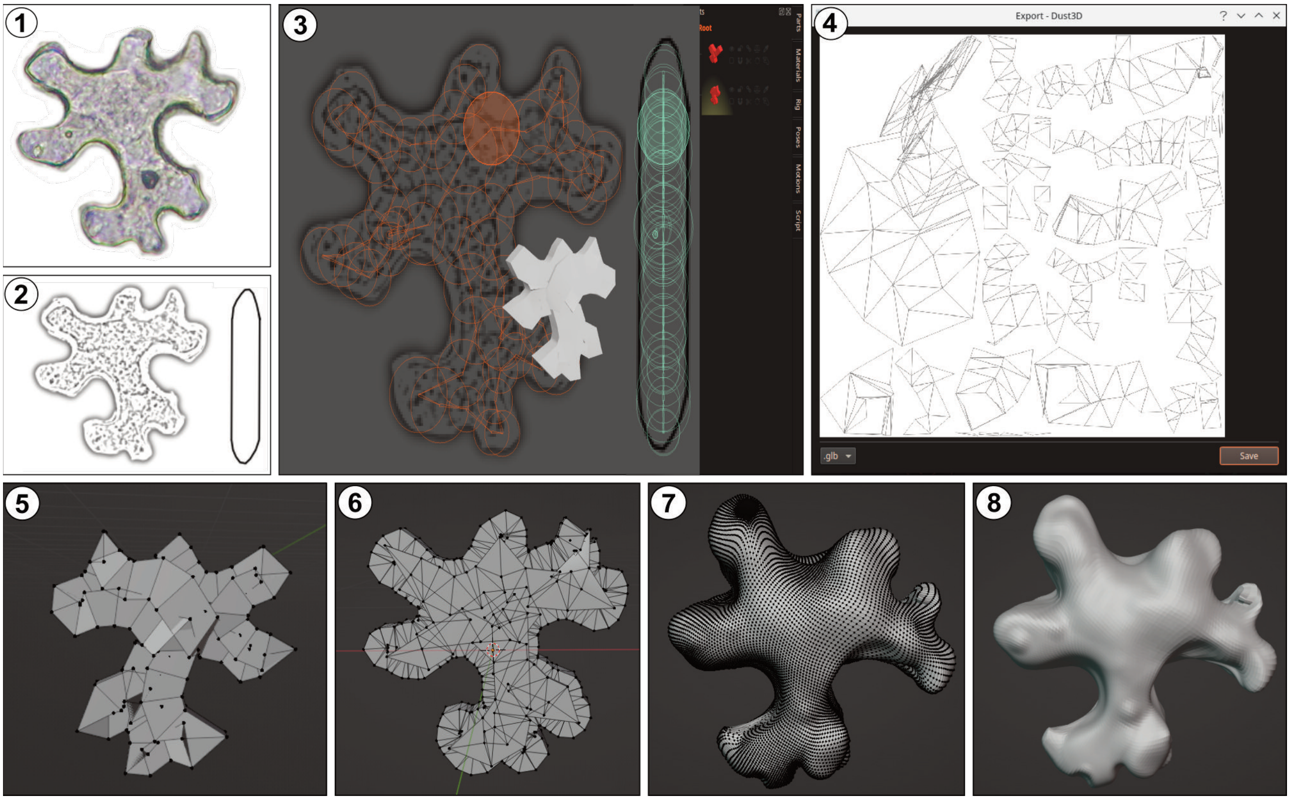


Figura 3. Renderización a partir de microfotografias de fitolitos. **1,** Foto original de un silicofitolito tipo *puzzle* o pieza de rompecabeza; **2**, Imagen de la misma en tonos de grises y delimitación de bordes en vista superficial y gráfica de contorno en vista lateral; **3,** Obtención de la volumetría del cuerpo mediante la estructuración de burbujas, realizadas con el *software* Dust3D; **4,** Conjunto de mallas generados en la obtención volumétrica; **5,** Cuerpo 3D que se origina de la importación de las mallas renderizado mediante el *software* Blender; **6,** Densificación de mallas y suavizado de superficies del cuerpo 3D importado; **7,** malla de *puzzle* realizado por tallado utilizando el *software* Blender; **8,** alisado del *puzzle* realizado por tallado utilizando el *software* Blender.

"Objeto" que brinda el *software* y accionado en la opción "Agregar", se generó un modelo base a esculpir (se recomienda una esfera o cubo ya que resulta más fácil y cómodo para recrear elementos), en este caso, morfotipos fitolíticos. A continuación, utilizando el menú "*Sculpting*", se activaron todas las herramientas que el programa ofrece para comenzar a modelar el objeto.

Los pasos básicos para modelar el morfotipo se iniciaron con la selección de herramientas específicas para que el mismo genere cambios de forma, por ejemplo aumentar un volumen en un área específica (herramienta "Capa"); por otro lado, *a posteriori* se generó un suavizado de las modificaciones realizadas anteriormente. En la barra superior de este modo se puede modificar el radio y la intensidad de cada herramienta que seleccionemos para modelar (Fig. 4.1). Por último, para obtener un fitolito lo más realista posible, además de contar con una imagen fotográfica del morfotipo a modelar, es recomendable estudiar todas las herramientas que ofrece el modo "*Sculpting*", ya que en el presente trabajo sólo se indican los pasos iniciales para realizarlo a modo de ejemplo.

Seguidamente, continuando en el *software* Blender y activando el modo edición "*Shading*", se visualizó y seleccionó el modelo a texturizar. Existen diferentes alternativas para generar una textura específica; se pueden aplicar diversos nodos de textura para dar ciertas características particulares, por ejemplo, mayor rugosidad, brillo, *etc*. Además, se pueden descargar texturas de repositorios (*e.g.*, www.textures.com) con la finalidad de importarlas en el *software* Blender. Si bien estas pueden ser retocadas, es una buena alternativa para generar una textura de base y de esta manera quitar el aspecto de figura digital del modelo 3D inicial (Fig. 4.2). Pero, además, se puede aplicar una textura determinada a partir de fotografías obtenidas

mediante microscopio óptico o bien electrónico de barrido, de acuerdo al aspecto que se le desea dar al cuerpo. Para las ilustraciones, los morfotipos fueron editados sobre una textura de tipo “Roca”. A continuación, mediante el modo edición “*Sculpting*”, se generó una textura extra mediante el uso de pincel de textura, en este caso, el efecto de ruido en superficie con una intensidad y radio específico. Finalmente, se vincularon estas tres alternativas para generar una ver-

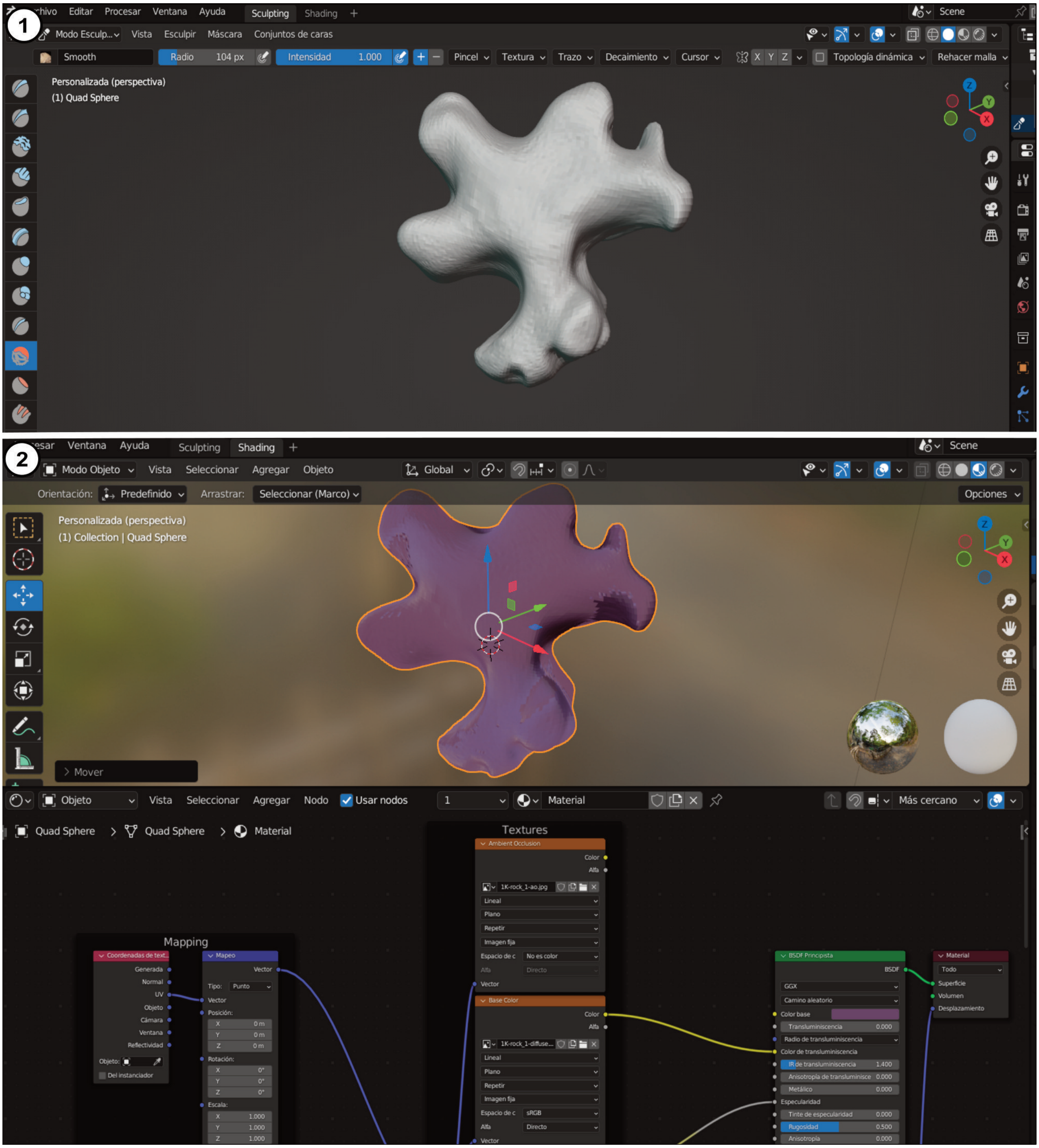


Figura 4. Modo “*Sculpting*” y “*Shading*” en etapa de edición utilizando el *software* Blender. **1,** Modo “*Sculpting*” generando suavizado en superficie; **2,** Modo “*Shading*” importando textura y editando nodos de textura.

sión de textura lo más realista posible. En síntesis, se aplicó una textura de roca con un color de base especial (Fig. 4), se vincularon nodos para una mayor rugosidad y con ello se logró un mayor detalle. Finalmente, mediante el modo "*Sculpting*", se retocó con ruido superficial para un acabado más realista del morfotipo.

Por último, los objetos fueron renderizados y exportados a un directorio específico en el almacenamiento de la computadora. Es recomendable aplicar un motor de renderizado potente como "*Cycles*" (Fig. 4.2) para obtener imágenes con mayor detalle y calidad (Fig. 5).

CONSIDERACIONES FINALES

La vinculación de diferentes *software* de acceso libre resulta de alta importancia para estudios de elementos en 3D relacionados con análisis paleontológicos. Este tipo de metodologías brinda a futuro un amplio abanico de posibilidades para estudiar la morfología de fitolitos en líneas generales. Si bien estas técnicas tienen muchas herramientas para optimizar el proceso, son un punto de partida importante en el área de edición gráfica, modelaje en 3D y su vinculación con el análisis de morfotipos fitolíticos.

Comparando los modelados resultantes en el método de burbujas mediante Dust3D (Fig. 3.5–6) y la técnica esculpir de Blender (Figs. 3.7–8, 5), es importante destacar que, si bien ambos lograron el objetivo principal de realizar un modelado de fitolitos de tres dimensiones, el primer método mencionado generó un modelo con poco detalle superficial y una coloración neutra; en cambio, el segundo, por medio del *software* Blender, generó detalles más específicos de coloración y textura que se podrían asemejar más a un morfotipo visualizado, por ejemplo, en microscopio electrónico de barrido. De igual modo, independientemente de la técnica de reconstrucción tridimensional, las mismas pueden ser mejoradas con un trabajo interdisciplinario, por

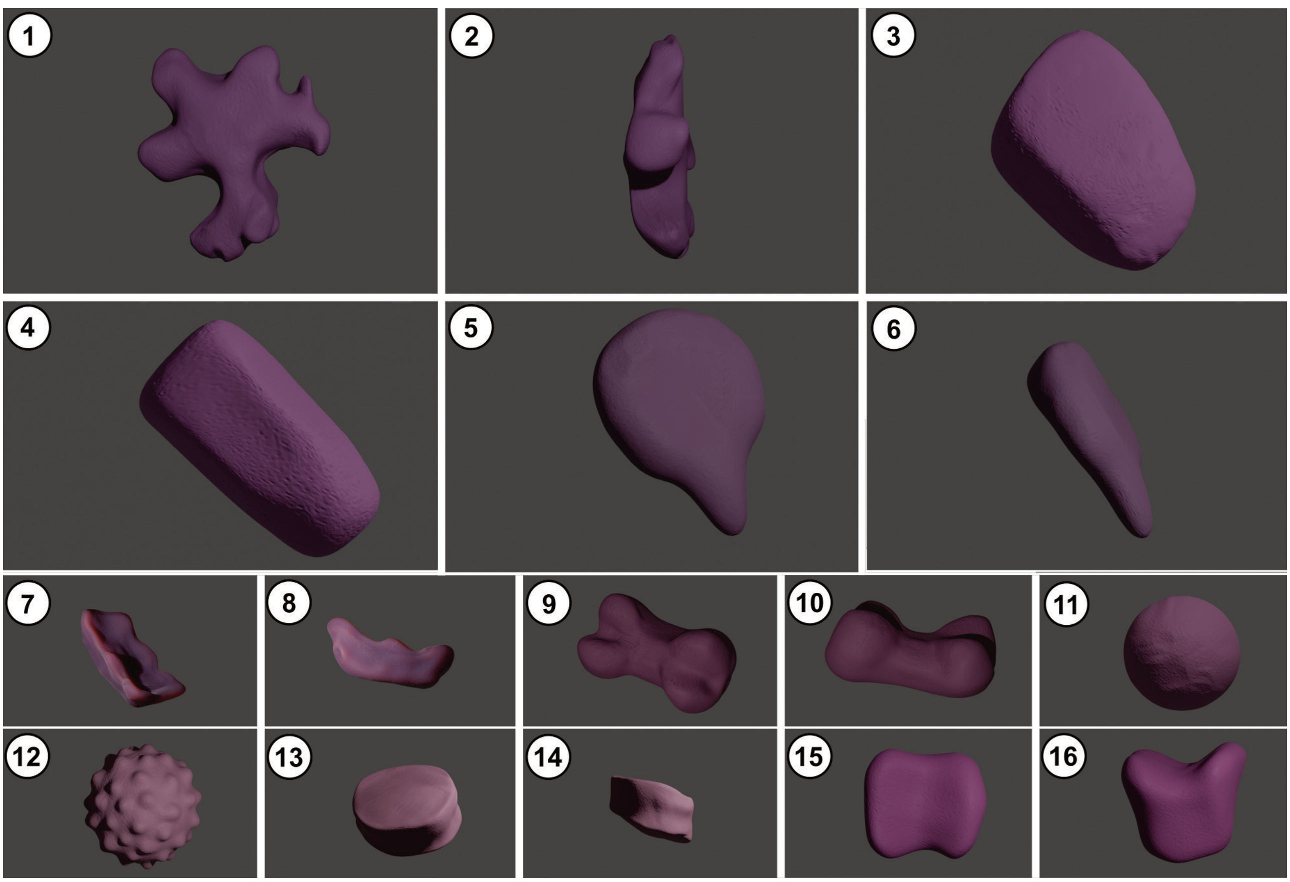


Figura 5. *Render* 3D en vista frontal y lateral de fitolitos esculpidos en el *software* Blender. **1–2,** *Puzzle*; **3–4,** Blocky; **5–6,** Bulliform flabellate; **7–8,** En forma de bote; **9–10,** Bilobate; **11,** Spheroid psilate; **12,** Spheroid echinate; **13–14,** Rondel; **15–16,** Saddle.

ejemplo, involucrando a paleoartistas, paleobotánicos y otros expertos. En este sentido, se puede realizar una revisión crítica tanto en la edición previa como en la posterior a la creación del objeto tridimensional, con el objetivo de perfeccionar el resultado final.

El presente trabajo expone dos metodologías para obtener modelos tridimensionales de morfotipos fitolíticos mediante uso de *software* de libre acceso. Esto es una propuesta eficaz para lograr modelados que brindarán no solo una forma amigable para visualizar dichos morfotipos sino también logra una manera efectiva para el conocimiento y entendimiento de la variedad de morfologías en morfotipos fitolíticos. Este tipo de trabajos inéditos en fitolitos brinda herramientas que pueden ser empleadas en plataformas o repositorios libres donde el público interesado pueda visualizar diferentes elementos e interactuar con el repositorio de morfotipos. Además, este tipo de contribuciones brinda la oportunidad de establecer vínculos con otros estudios, como es el caso de morfometría geométrica aplicada en silicofitolitos. Por ejemplo, en investigaciones donde se expresen cambios de tamaño y forma de morfotipos fitolíticos, se pueden representar dichas variaciones mediante modelos 3D. Esta aplicación resulta relevante en diversos contextos, como la paleontología, arqueología, taxonomía y tafonomía.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue subsidiado por el proyecto PIP (Programa de Incentivos a los Investigadores) del CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas) 11220200100509CO.

REFERENCIAS

Adelson, E. H., Anderson, C. H., Bergen, J. R., Burt, P. J. y Ogden, J. M. (1984). Pyramid methods in image processing. *RCA Engineer*, *29*(6), 33–41.

Alexandre, A., Basile-Doelsch, I., Delhaye, T., Borshneck, D., Mazur, J. C. y Reyerson, P. (2015). New highlights of phytolith structure and occluded carbon location: 3-D X-ray microscopy and NanoSIMS results. *Biogeosciences*, *12*, 863–873.

Autodesk INC. (2019). *Maya*. Disponible en https://autodesk.com/maya.

Babot, M. P., Musaubach, M. G. y González, J. A. (2016). Continuo morfológico y fitolitos 3D. Aportes desde una perspectiva arqueobotánica para definir conjuntos fitolíticos. En A. F. Zucol, N. I. Patterer, M. M. Colobig y E. Moya (Eds.), *Libro de Resúmenes del I Taller de Micropaleoetnobotánica. Relevancia de una Red Interdisciplinaria de Investigaciones en Fitolitos y Almidones* (pp. 76–81). Diamante.

Bernardini, F. y Rushmeier, H. (2002). The 3D Model Acquisition Pipeline. *Computer Graphics Forum*, *21*, 149–172.

Blackman, E. (1971). Opaline silica in the range grasses of southern Alberta. *Canadian Journal of Botany*, *49*, 769–781.

Boyde, A. (2004). Improved depth of field in the scanning electron microscope derived from through-focus image stacks. *Scanning*, *26*, 265–269.

Brecko, J., Mathys, A., Dekoninck, W., Leponce, M., VandenSpiegel, D. y Semal, P. (2014). Focus stacking: Comparing commercial top-end set-ups with a semi-automatic low budget approach. A possible solution for mass digitization of type specimens. *ZooKeys*, *464*, 1–23.

Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F. y Ranzuglia, G. (2008). Meshlab: an open-source mesh processing tool. *6th Eurographics Italian Chapter Conference* (pp. 129–136). Salerno.

Davies, A. (2010). *Close-up and macro photography*. Focal Press, Elsevier.

Domínguez-Quintana, L., Rodríguez-Florido, M. A., Ruiz-Alzola, J. y Sosa, D. (2004). Modelado 3D de escenarios virtuales realistas para simuladores quirúrgicos aplicados a la funduplicatura de Nissen. *Revista Científica de la Sociedad Española de Informatica y Salud*, *48*, 14–20.

Ellis, R. P. (1979). A procedure for standardizing comparative leaf anatomy in the Poaceae. The leaf-blade as viewed in transverse section. *Bothalia*, *12*, 65–109.

EOS Systems Inc. (1997*). Photomodeler Pro User Manual 12th Edition.* EOS Systems Inc.

Erdtman, G. (1969). *Handbook of Palynology. An introduction to the study of pollen grains and spores*. Munksgaard.

Gallaher, J. T., Akbar, S. Z., Klahs, P. C., Marvet, C. R., Senske, A. M., Clark, L. G. y Strömberg, C. A. E. (2020). 3D shape analysis of grass silica short cell phytoliths: a new method for fossil classification and analysis of shape evolution. *New Phytologist*, *228*, 376–392.

Gallo, A., Muzzupappa, M. y Bruno, F. (2014). 3D reconstruction of small sized objects from a sequence of multi-focused images. *Journal of Cultural Heritage*, *15*(2), 173–182.

Goldsmith, N. T. (2000). Deep focus; a digital image processing technique to produce improved focal depth in light microscopy. *Image Analysis & Stereology*, *19*, 163–167.

Hess, R. (2010). *Blender Foundations: The Essential Guide to Learning Blender 2.6*. Focal Press, Elsevier.

Lanza, D. (2015). *El uso de software libre en la teoría y práctica artística. Blender como plataforma digital para la creación escultórica*. [Tesis de Maestría, Universidad Complutense].

McNeel, R. (2010). *Rhinoceros 3D, Version 6.0*. Robert McNeel & Associates.

Metcalfe, C. (1960). *Anatomy of the Monocotyledons. 1. Gramineae*. Clarendon Press.

Neumann, K., Strömberg, C. A. E., Ball, T., Albert, R. M., Vrydagh, L. y Scott Cumming, L. (2019). International code for phytolith nomenclature (ICPN) 2.0. *Annals of Botany*, *20*, 1–11.

Payne, A. (2011). *Rapidform XOR3 Interface Basics. CAST Technical Publications Series*, *5963*, 1–4.

Piperno, D. R. (1988). *Phytolith analysis: an archaeological and geological perspective*. Academic Press.

Piperno, D. R. (2006). *Phytolith. A comprehensive guide for archaeologist and paleoecologist*. Altamira Press.

Rusu, R. B. y Cousins, S. (2011). 3D is here: Point Cloud Library (PCL). *Institute of Electrical and Electronics Engineers, International Conference on Robotics and Automation* (pp. 1–4). Shanghai.

Rovner, I. (1971). Potential of opal phytoliths for use in paleoeco-

logical reconstruction. *Quaternary Research*, *9*(3), 343–359.
Ruiz Torres, D. (2017). El uso de tecnologías digitales en la conservación, análisis y difusión del patrimonio cultural. *Anuario AC/E de Cultura Digital*, *1*, 129–227.
Sederberg, T. W., Zheng, J., Bakenov, A. y Nasri, A. (2003). T-splines and T-NURCCSs, ACM Trans. *Graph*, *22*(3), 477–484.
Tindall, A. y Kalms, B. (2012). *Guidance: Photographing specimens in natural history collections*. Atlas of Living Australia.
Tomlinson, P. B. (1961). *Anatomy of the Monocotyledons. 2. Palmae*. Oxford University Press.

doi: 10.5710/PEAPA.25.08.2023.475

Recibido: 23 de mayo 2023
Aceptado: 28 de agosto 2023
Publicado: 13 de septiembre 2023